

Dr.-Ing. **Peter Langer**, KBA - Bogenoffset, Radebeul;

Bestimmung der Übertragungsgüte von Riementrieben

Determining the transmission quality of belt drives

Kurzfassung

Der zentrale Antrieb von Maschinen erfolgt häufig über einen Riementrieb, da eine Drehzahl-anpassung einfach und kostengünstig zu realisieren ist. Für Maschinen mit hohen verarbei-tungstechnischen Forderungen hinsichtlich der Qualität, z.B. zerspanende Werkzeug-maschinen oder Druckmaschinen, ist oftmals die Übertragungsgüte des Riementriebes der begrenzende Faktor für Leistungssteigerungen oder Qualitätsverbesserungen. Aus der Über-tragungsgüte des Riementriebes resultieren dynamische Kräfte/ Momente, die als dynami-scher Erreger in der Maschine wirken. Um den Einfluss der Übertragungsgüte eines Riemen-triebcs zu verstehen, ist das dynamische Verhalten der gesamten Maschine notwendig zu betrachten. Dies wird kurz am Beispiel einer Druckmaschine erläutert.

Grundvoraussetzung zur Verbesserung der Übertragungsgüte eines Riementriebes ist eine wiederholbare messtechnische Bestimmung der Übertragungsgüte. Die in der KBA genutzte und dazu entwickelte Methodik wird vorgestellt.

Aus der messtechnischen Untersuchung zur Übertragungsgüte werden Frequenzbereichs-sowie Zeitbereichsergebnisse für die untersuchten Poly-V-Riemen präsentiert und interpre-tiert. Die ermittelten Abhängigkeiten, die vom Riemen selbst resultieren, sowie aus dem Zu-sammenwirken aller Bauteile eines Riementriebes beruhen, werden diskutiert.

Die vorgestellte Methodik zur Bestimmung der Riemengüte ist nicht auf die Untersuchung von Poly-V-Riemen oder Riementrieben beschränkt und kann für alle gleichförmig überset-zenden Getriebe genutzt werden. Die Methodik ermöglicht nachfolgend eine extrem präzise Bestimmung der Übertragungsgüte.

Abstract

The main drive of a machine is usually transferred through a belt drive as adjustments to speed can be carried out easily and cost effectively. The transmission quality of a belt drive

is often a limiting factor when improving performance or quality for machines with technologically high finishing demands regarding quality, e.g. drilling and milling machines or printing presses. Dynamic forces/moments, which work as dynamic exciters in a machine, result from the transmission quality. In order to understand the influence of a belt drive's transmission quality it is necessary to look at the dynamic behavior of an entire machine. This will be briefly explained using a printing press as an example.

A repeatable metrological determination of the transmission quality is key to improving a belt drive's transmission quality. The method developed and used at KBA will be presented in this article.

The frequency range and time range results for the tested poly-V-belts from this metrological study on transmission quality will be presented and interpreted. Identified dependencies which result from the belts as well as the collective effect of all the components in a belt drive will be discussed in this article.

The method presented for determining belt quality is not just limited to inspecting poly-V-belts or belt drives, it can be used for all uniform transmission gears. It allows transmission quality to be determined extremely precisely.

1. Einleitung

Die schematische Darstellung einer Bogenoffset-Druckmaschine ist in Bild 1 abgebildet. Bogenoffset-Druckmaschinen bedrucken einzelne Papierbögen, die zu Beginn von einem Papierstapel vereinzelt werden. Danach werden die Papierbögen auf Bogenlaufgeschwindigkeit beschleunigt und von Zylinder zu Zylinder durch die Maschine gefördert. Während des Förderns werden die Papierbögen bedruckt. Um das Fördern der Papierbögen auf den einzelnen Zylindern zu realisieren, sind auf den Zylindern spezielle Greifersysteme angebracht. Am Ende werden die einzelnen Papierbögen abgebremst und auf einem Stapel abgelegt.

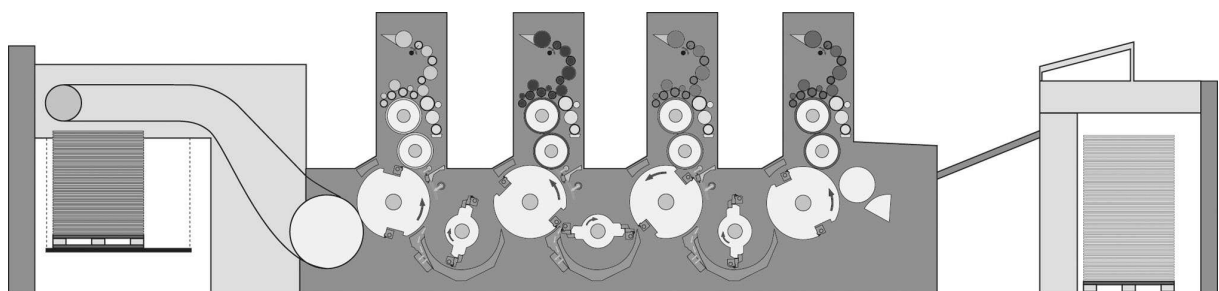


Bild 1 Schematische Darstellung einer Bogenoffset-Druckmaschine

Da die Papierbögen während des Förderns für einen Mehrfarbdruck in den Druckwerken an mehreren Stellen bedruckt werden und die Farben zwischen den einzelnen Druckwerken noch nicht abgetrocknet sind, ist die Synchronisation der einzelnen Zylinder und Greifersysteme von extrem wichtiger Bedeutung. Die Synchronisation der einzelnen Zylinder erfolgt aus diesem Grund mittels Zahnrädern. Bei der KBA dient der aus den Zahnrädern gebildete Räderzug gleichzeitig der Momentenübertragung zum Antreiben der Maschine selbst.

Ist die Synchronisation der einzelnen Zylinder nicht genügend gewährleistet, entstehen Fehler im Druckbild. Einige typische Fehler wie Schieben und Dublieren sind in

Bild 2 dargestellt. Im Zusammendruck mehrerer Farben resultieren aus diesen Fehlern leicht erkennbare Farbdriften, Streifen etc. Um diesen Fehlern vorzubeugen, ist es notwendig, die statischen sowie dynamischen Eigenschaften des Räderzuges genau zu kennen.

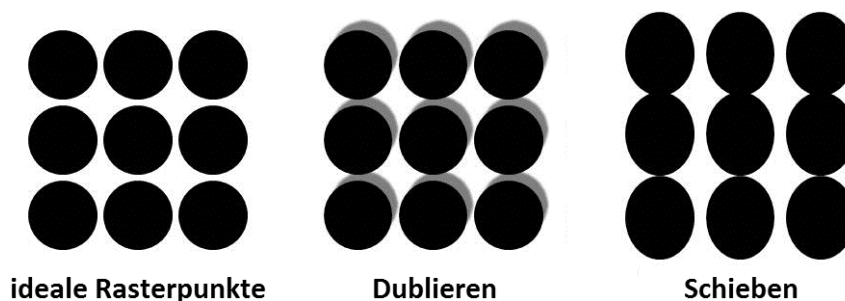


Bild 2 Fehler im Druckbild

2. Die Druckmaschine – ein Torsionsschwinger

Durch die Kopplung der einzelnen Zylinder in einer Druckmaschine mittels Zahnrädern ergibt sich ein schwingungsfähiges System. Durch die Trägheitsmassen der Zylinder mit den Zahnrädern sowie den Steifigkeiten, die sich im Wesentlichen aus Zahnsteifigkeiten und Schenkelsteifigkeiten ergeben, kann bereits eine gute Abschätzung der untersten Eigenfrequenzen eines solchen Schwingers erfolgen. Aus Messungen, wie in Bild 3 dargestellt, wurden bei der KBA in Radebeul über die Formate hinweg erste Eigenfrequenzen zwischen ca. 5-25Hz gemessen (Mittel-, Groß- und Supergroßformat). Die Schwingform zur ersten Eigenfrequenz entspricht der in Bild 4 dargestellten. Der vordere Teil der Maschine schwingt gegenphasig zum hinteren Teil der Maschine.

Durch den Hauptantrieb der Maschine über den Riementrieb am ersten Druckzylinder hat die Schwingform am Hauptantrieb selbst die größten Schwingungsamplituden. Daraus folgt, dass kleinste Erregungen durch den Hauptantrieb oder den Riementrieb im Resonanzfall zu großen erregten Schwingungen der ganzen Maschine führen.

Wie aus Bild 3 zu erkennen, ergeben sich aus der periodischen Erregung der in einer Druckmaschine verwendeten Mechanismen eine Vielzahl Harmonischer zur Grunddrehzahl. Deutlich sichtbar ist ebenfalls, dass mehrere Harmonische bei verschiedenen Ausbringungen der Maschine in Resonanz mit der ersten Eigenfrequenz gehen. Von Bedeutung ist nun für den Riementrieb, auf welche Art und Weise er mit den bereits besprochenen Erregungen der Mechanismen interagiert.

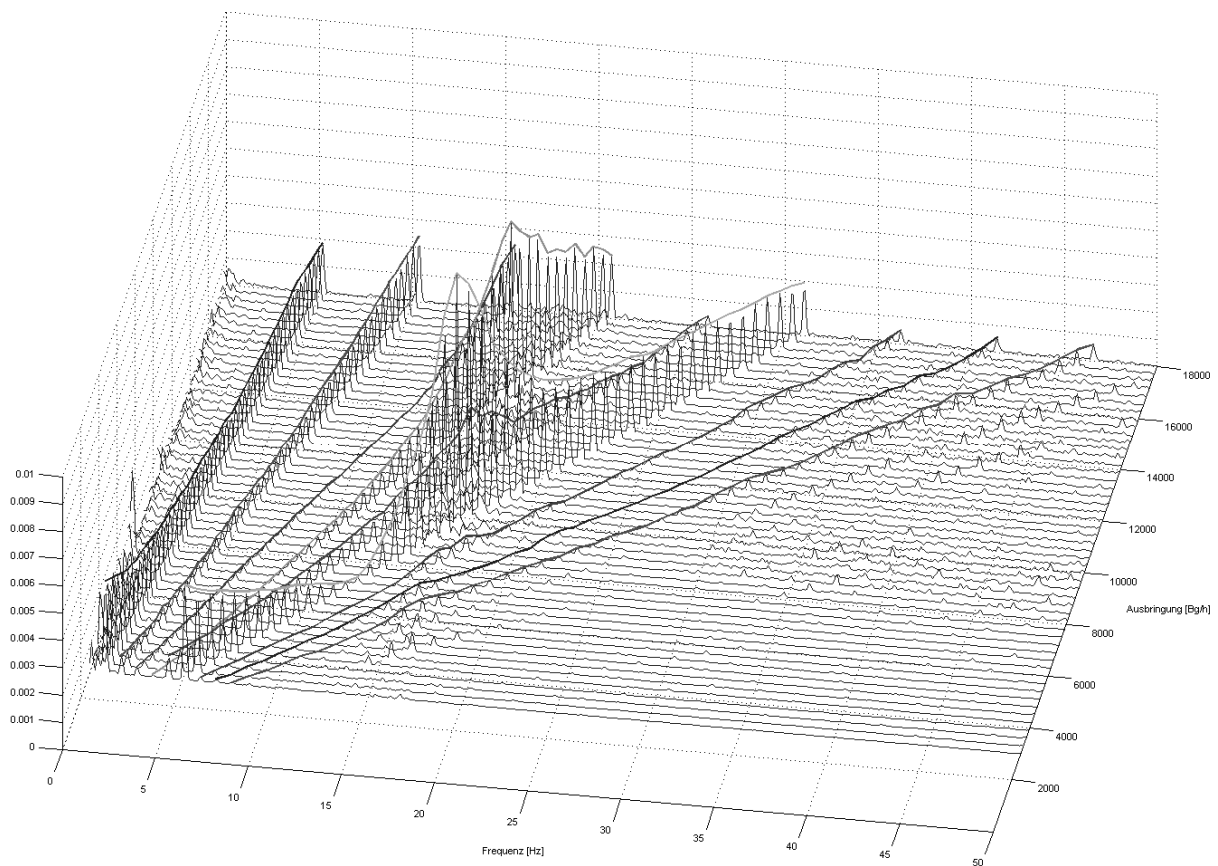


Bild 3 Wasserfalldiagramm einer Druckmaschine, Eigenfrequenz bei ca. 17Hz, $f_0 = 0.8 \cdot 5\text{Hz}$ (1. Harm.)

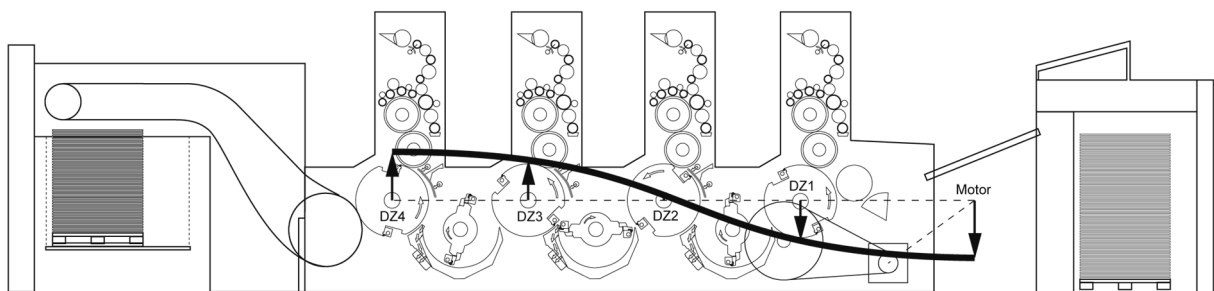


Bild 4 Schwingform zur ersten Eigenfrequenz einer Druckmaschine

In Bild 5 sind aus einer hochauflösenden FFT am letzten Gummizylinder einer Maschine neben den Harmonischen auch weitere relevante Amplituden zu erkennen. Mittels Kenntnis der geometrischen Verhältnisse kann die Spitze im Spektrum bei 8.36Hz dem einfachen Riemenumlauf des Hauptantriebs zugeordnet werden. Aus diesem Grund entspricht die Spitze im Spektrum bei 16.73Hz der 2. Harmonischen des Riemenumlaufes. Da die 2. Harmonische des Riemenumlaufes sowie die 4. Harmonische der Maschine sehr nahe der Resonanz zur ersten Eigenfrequenz der Maschine wirken (ca. 17Hz), werden durch die Resonanzüberhöhung wesentliche Schwingungsamplituden im Räderzug der Maschine erzwungen. Die Überlagerung der beiden Erreger führt weiterhin zu einer Schwebung. Während des Abdruckens der untersuchten Maschine ist aufgefallen, dass ein Übergabe-Passerproblemen ca. aller 15 Bögen auftritt. Das heißt, dass die überlagerten Schwingungen im Räderzug aller ca. 15 Bögen dazu führen, dass die Vorspannung der Zahnräder durch das Antriebsmoment aufgehoben wird. Im Bild 6 ist die zeitliche Überlagerung der erzwungenen Schwingungen dargestellt sowie die Verbesserung durch den Einsatz eines guten Poly-V-Riemens.

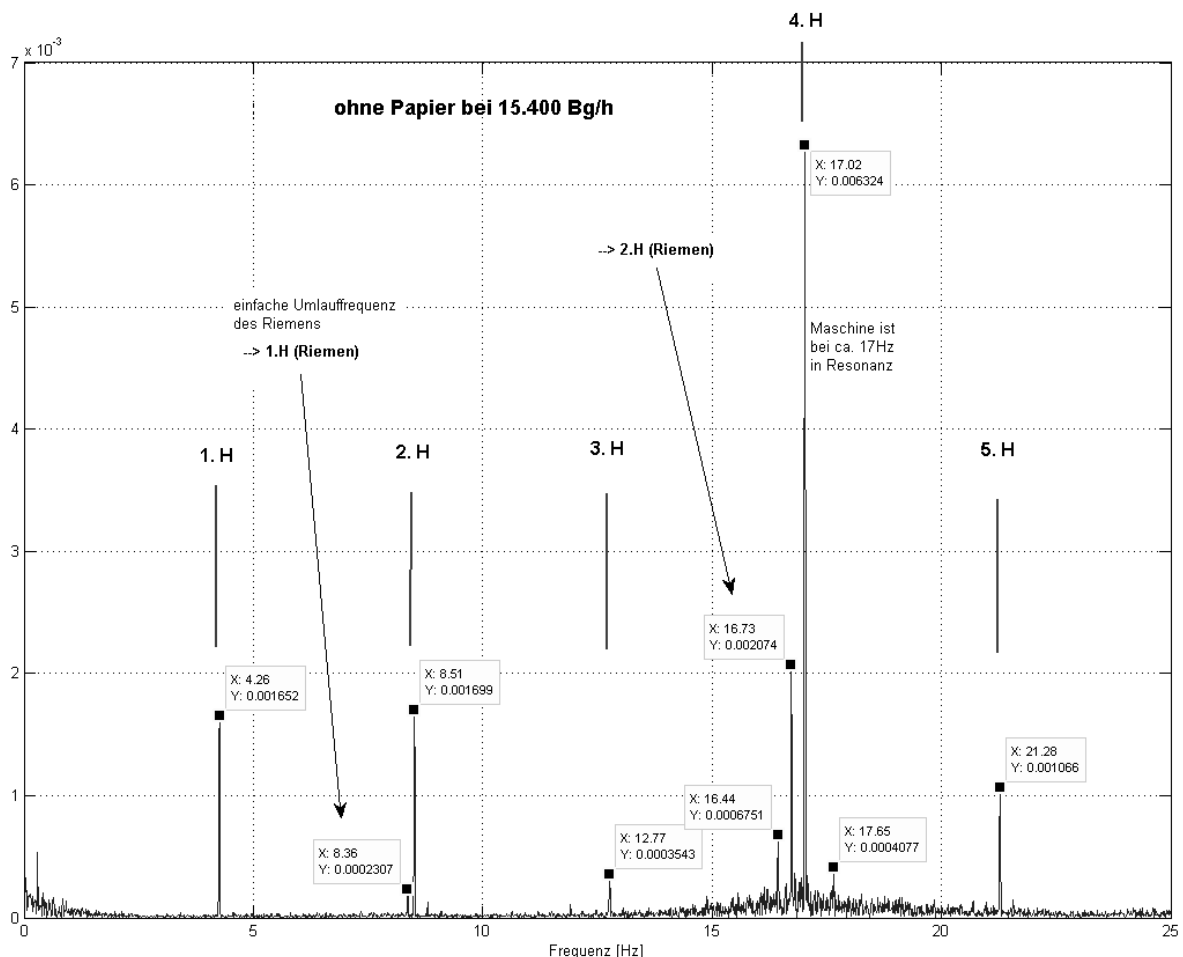


Bild 5 Hochauflösendes Spektrum einer Druckmaschine, gemessen am letzten Gummizylinder bei einer Ausbringung von 15.400Bg/h

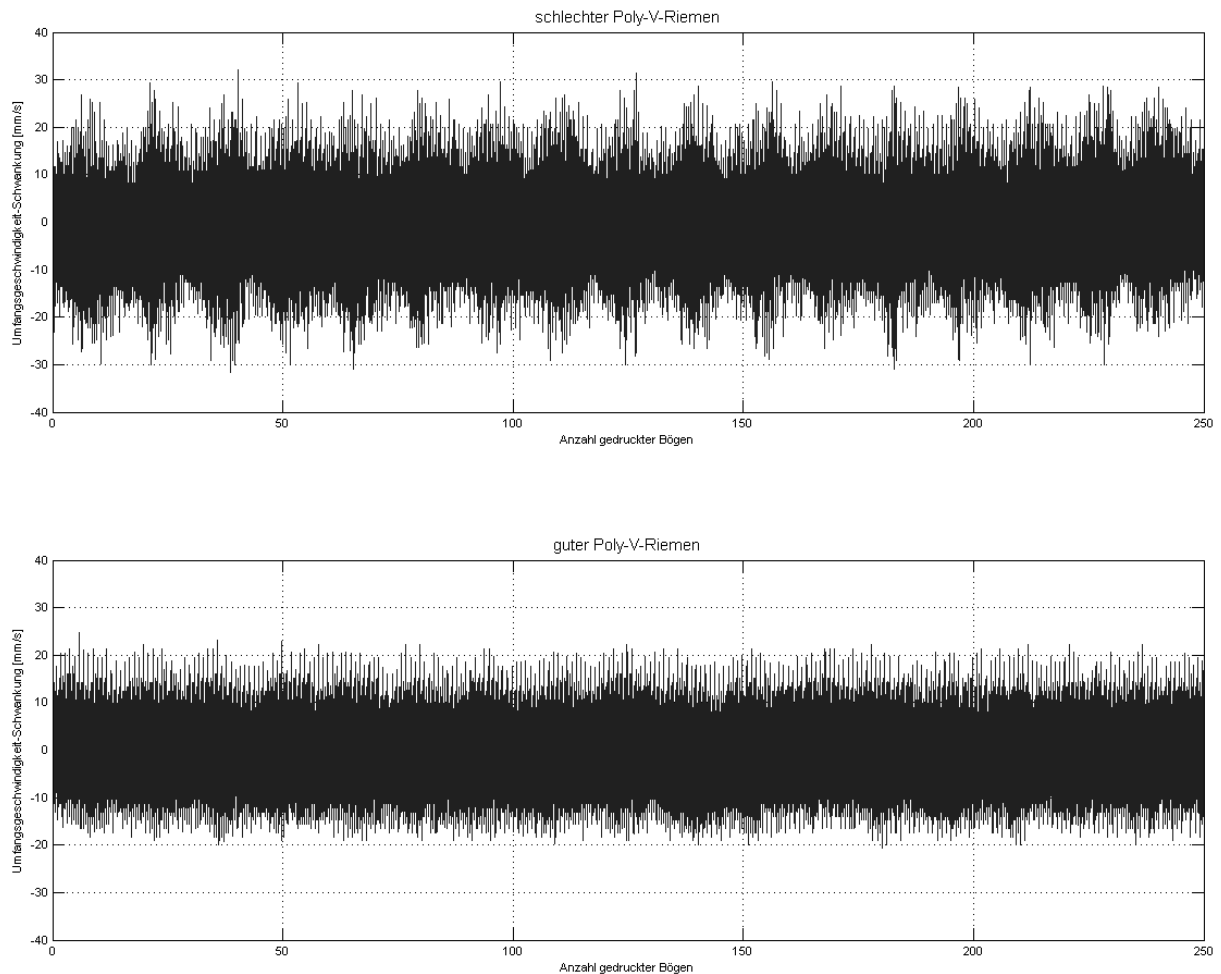


Bild 6 Schwebung zwischen der 4. Harm. der Maschine mit der 2. Harm. des Riemenumlaufes

Aus dem vorgestellten Beispiel ist bereits die Bedeutung zur Bestimmung der Übertragungsgüte von Riementrieben hergeleitet. Zur Vollständigkeit sei erwähnt, dass weitere höhere Harmonische des Riemens weitere Fehler im Druckbild wie z.B. Streifen hervorrufen, die durch diverse Resonanzen im Räderzug hervorgerufen werden.

3. Verwendete Hardware zur Bestimmung der Übertragungsgüte von Riemen

Damit die Übertragungsgüte von Riemen bestimmt werden kann, muss der Riemen grundsätzlich auf ein Paar Riemenscheiben gespannt werden (Bild 7). Es ist empfehlenswert, die Riemenscheibendurchmesser anfangs derart zu wählen, dass sie den real genutzten Durchmessern entsprechen, da die Riemenscheibendurchmesser das Untersuchungsergebnis beeinflussen können (→ Abschnitt 5). Um die Übertragungsgüte letztlich bestimmen zu können, muss eine Riemenscheibe angetrieben werden, der Antrieb der zweiten Riemenscheibe erfolgt dann mittels des zu prüfenden Riemens.

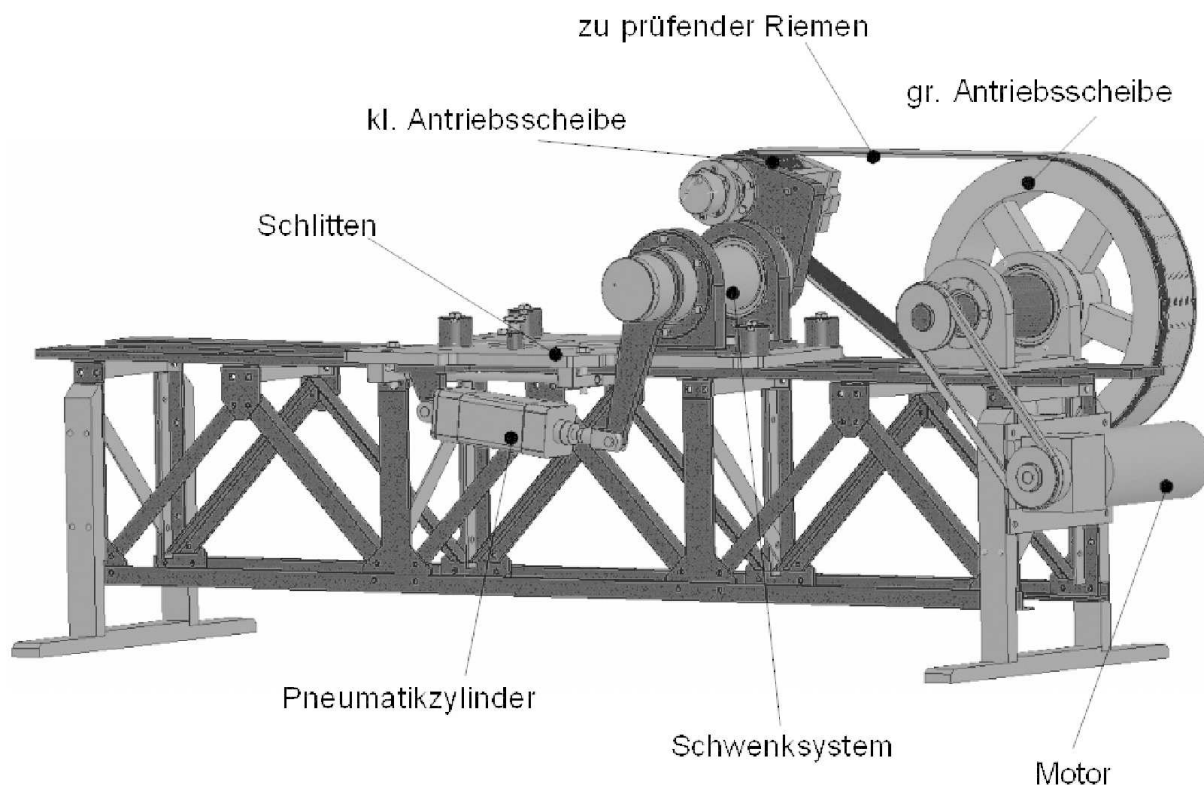


Bild 7 Entwurf eines Riemenprüfstandes[1]

Messtechnische Voraussetzung für die bei der KBA genutzten Methode zur Bestimmung der Übertragungsgüte von Riemen ist die Messung der Drehungen der zwei Wellen, auf denen die zwei Riemenscheiben zum Spannen der Riemen montiert sind. Dazu werden bei der KBA Winkelmessgeräte der Fa. Heidenhain genutzt. Damit Fehler des Riemenprüfstandes möglichst einfach eliminiert werden können, wird zusätzlich zu den Drehungen der Achsen der einfache Riemenumlauf des Riemens gemessen.

4. Algorithmen zur Bestimmung der Übertragungsgüte von Riemen

Bedingt durch das Fertigungsverfahren von Riemen, ergeben sich bei Riementrieben über einen Riemenumlauf mikroskopisch betrachtet, ungleichförmige Übersetzungsverhältnisse. Aus dem schwankenden Übersetzungsverhältnis folgt für den Antrieb einer Druckmaschine ein schwankendes Antriebsmoment, welches wiederum eine Schwingungserregung der Druckmaschine bewirkt. Da die Erregung periodisch mit dem Riemenumlauf erfolgt, kann die Bestimmung der Übertragungsgüte von Riemen erfolgen, indem die Erregung in ihre harmonischen Anteile (→ Harmonische des Riementriebes) zerlegt wird. Die somit ermittelten

Harmonischen des Riementriebes können zur Beurteilung der Übertragungsgüte des Riemens benutzt werden (Gl. 1, Gl. 2).

$$i = n_{\text{Antrieb}}/n_{\text{Abtrieb}} = \sum i_k * \cos (2 * \pi * k * 1/t_0 + \alpha_k), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \infty \quad (\text{Gl. 1})$$

i	Übersetzungsverhältnis
$n_{\text{Antrieb}}, n_{\text{Abtrieb}}$	Drehzahl des An- bzw. Abtriebs
i_k	k-te Harmonische des Riemens
t_0	Zeit für einfachen Riemenumlauf
α_k	Phasenverschiebung der k-ten Harmonischen des Riemens

Um die Übertragungsgüte von Riemen unabhängig vom Übersetzungsverhältnis vergleichbar zu machen, wird bei der KBA eine Normierung durch das mittlere Übersetzungsverhältnis vorgenommen (Gl. 2). Mittels Festlegung von Grenzwerten für die einzelnen harmonischen Anteile kann eine Klassifikation der Übertragungsgüte erfolgen.

$$\ddot{u}_k = i_k/i_d \quad (\text{Gl. 2})$$

\ddot{u}_k	zu beurteilende Fehlergröße des Riemens, d.h. auf i_d normierter k-ter harmonischer Anteil des Übersetzungsverhältnis
i_d	durchschnittliches Übersetzungsverhältnis über einen Riemenumlauf

Die messtechnische Bestimmung der Übertragungsgüte erfolgt mittels der beiden Winkelmeßgeräte auf den Wellen der Riemenscheiben. Der Quotient der gemessenen Drehzahlen beschreibt direkt den zeitlichen Verlauf des Übersetzungsverhältnisses. Mittels Fouriertransformation (FFT) kann der Quotient der Riemendrehzahlen, das Übersetzungsverhältnis, in den Frequenzbereich transformiert werden. Der Nachteil einer derartigen Betrachtung ist, dass die dem Riementrieb zugehörigen Frequenzen mit der Drehzahl des Antriebes variieren. Wird zusätzlich zu den beiden Drehzahlen der Riemenscheiben der einfache Riemenumlauf bestimmt, kann eine Ordnungsanalyse durchgeführt werden. Die Ordnungsanalyse hat den Vorteil, dass die Ordnungen direkt mit den Harmonischen des Riementriebes korrelieren und nicht mit der Drehzahl des Antriebes variieren. Das Ergebnis einer solchen Berechnung ist in Bild 8 dargestellt. Grundsätzlich wäre es ausreichend, das Übersetzungsverhältnis über genau einen Riemenumlauf zu ermitteln. Der Nachteil der Messung nur über einen Riemenumlauf ist, dass Störungen die aus dem Versuchsstand resultieren, nicht eliminiert werden können. Aus diesem Grund werden bei der KBA mehrere Riemenumläufe gemessen. Bestimmt wird die Anzahl der gemessenen Riemenumläufe derart, dass alle störenden, nicht den Riemen betreffende Fehler sicher eliminiert werden können. Die aus

einem Versuchstand resultierenden Fehler sind ebenfalls in Bild 8 gut zu erkennen (Spitzen im Spektrum zwischen den Riemen-Harmonischen).

Werden mittels einer solchen Ordnungsanalyse nur die den Riementrieb betreffenden Harmonischen ausgelesen, folgt aus einer Ordnungsanalyse wie in Bild 8 dargestellt ein Spektrum, dass nur noch die Eigenschaften des Riementriebes widerspiegelt (Bild 9). Mittels dieses Verfahrens werden störende Einflüsse, die aus einem Riemenprüfstand resultieren, eliminiert. Zusätzlich kann durch das Benutzen nur einer bestimmten Anzahl von Harmonischen eine weitere Hoch-, Tief- oder Bandpassfilterung erreicht werden. Diese weitere Filterung ist hilfreich, wenn die spektralen Ergebnisse wieder in den Zeitbereich transformiert werden (mit Berücksichtigung der Phase). Mittels einer solchen Rücktransformation der Harmonischen eines Riemens in den Zeitbereich ist es deutlich einfacher möglich, den Ort und die Ursache von Fehlern in der Übertragungsgüte eines Riemens festzustellen (Synthese). Das Ergebnis einer solchen Synthese für den Riemen aus Bild 9 ist in Bild 10 dargestellt. Da die Darstellung aus Bild 10 direkt den zeitlichen Verlauf der Drehzahlschwankung des Abtriebes widerspiegelt (bei konstantem Antrieb), entspricht die Ableitung dem zeitlichen Verlauf der Momentenschwankung durch den Riementrieb, der auf die Druckmaschine wirkt (Bild 11).

5. Einflussgrößen auf die Übertragungsgüte von Riemen

Im vorangegangenen Abschnitt wurde die Übertragungsgüte eines untersuchten Poly-V-Riemens vorgestellt (Bild 9). Diese Untersuchung wurde mit Standard-Riemenscheiben durchgeführt, die etwa im Durchmesser Verhältnis von 4:1 standen. Um den Einfluss der Riemenscheibendurchmesser auf die Übertragungsgüte beurteilen zu können, wurde der Durchmesser der Riemenscheiben (RS) bei dem vorher untersuchten Riemen für weitere Messungen variiert. Eine Vergrößerung der kleinen Riemenscheibe um 65% und ein Durchmesser Verhältnis von 2:1, ergibt eine stark verbesserte Übertragungsgüte (Bild 12).

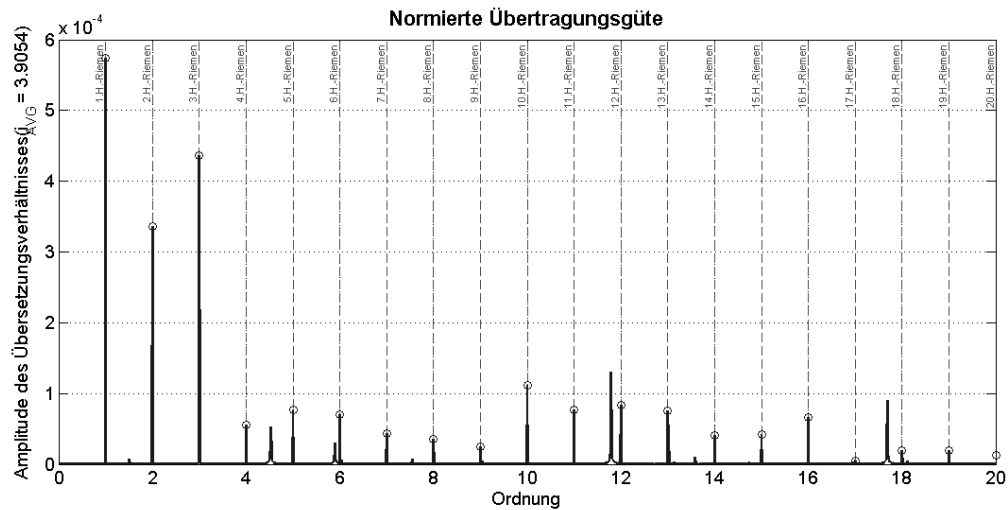


Bild 8 Hochauflösende Ordnungsanalyse eines Poly-V-Riemetriebes

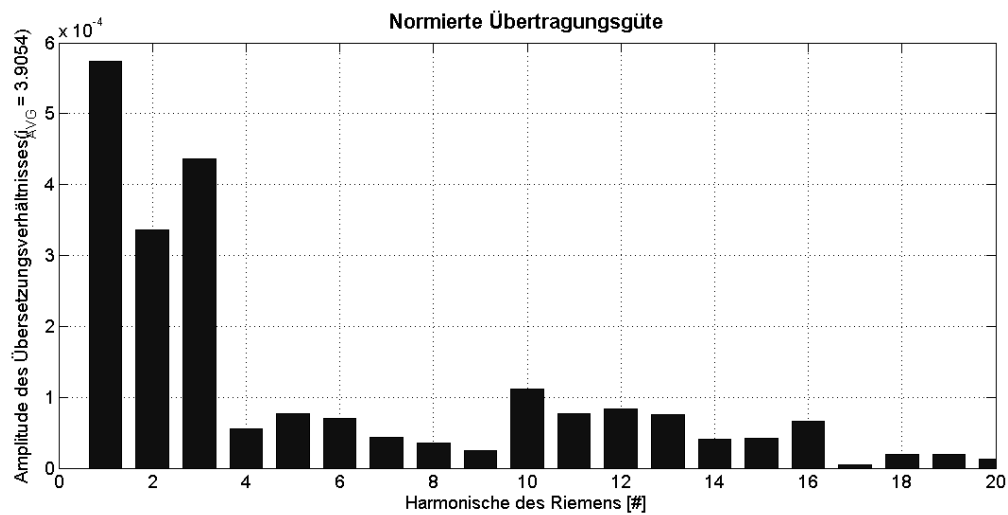


Bild 9 20 Harmonische eines Poly-V-Riemetriebes, Riemenscheiben-Durchm.verhältnis ca. 4:1

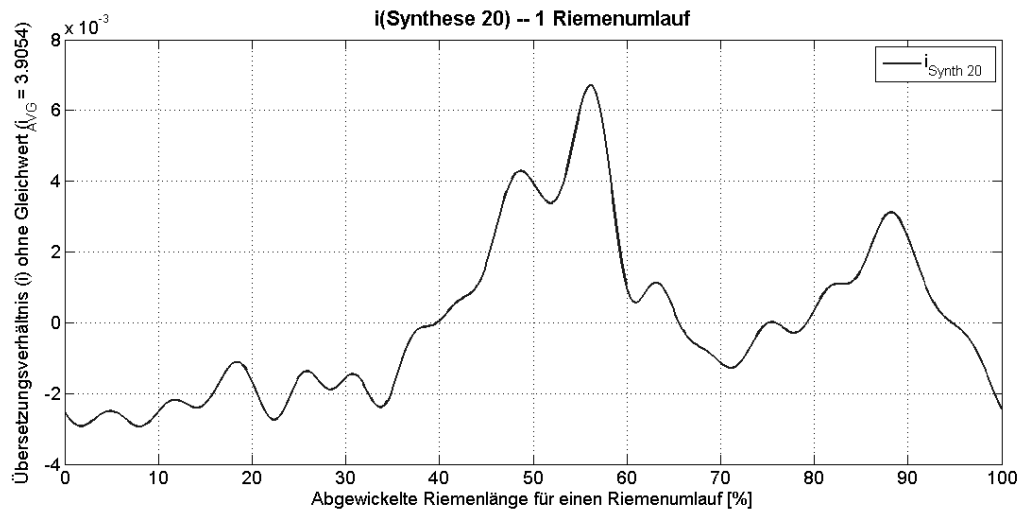


Bild 10 Rücktransformation der Harmonischen 1-20 des Riemetriebes auf den Riemenlauf

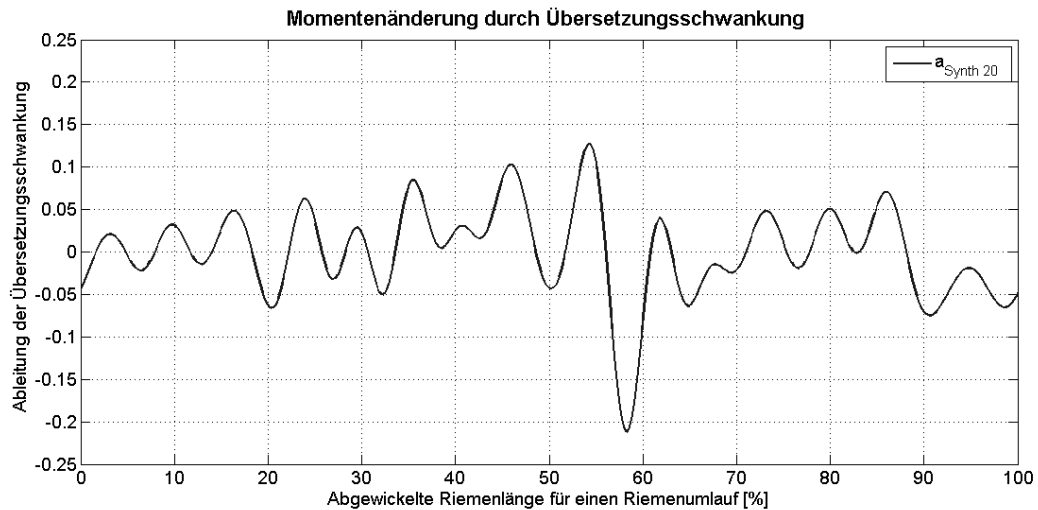


Bild 11 Schwankung des Antriebsmomentes in Folge der Übersetzungsschwankung

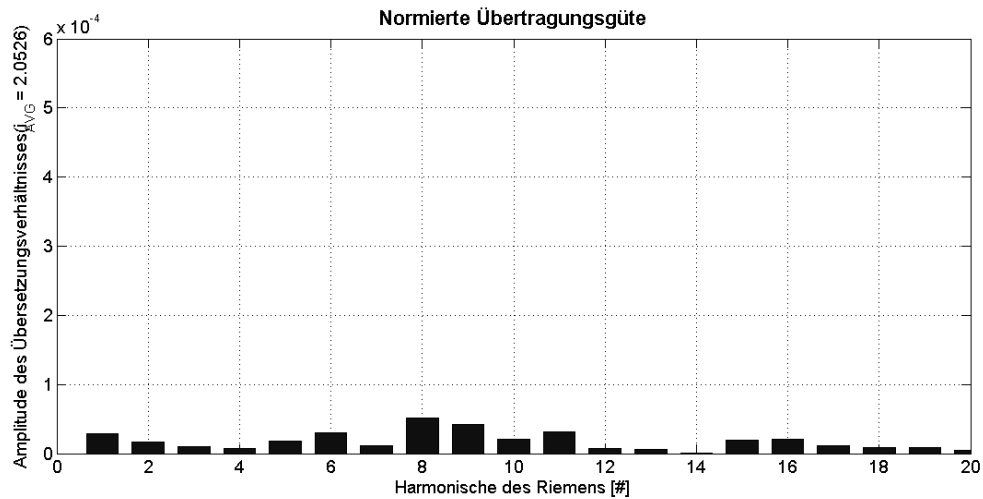


Bild 12 Riemenscheiben-Durchmesser Verhältnis ca. 2:1, kleine RS ca. 65% größer als in Bild 9

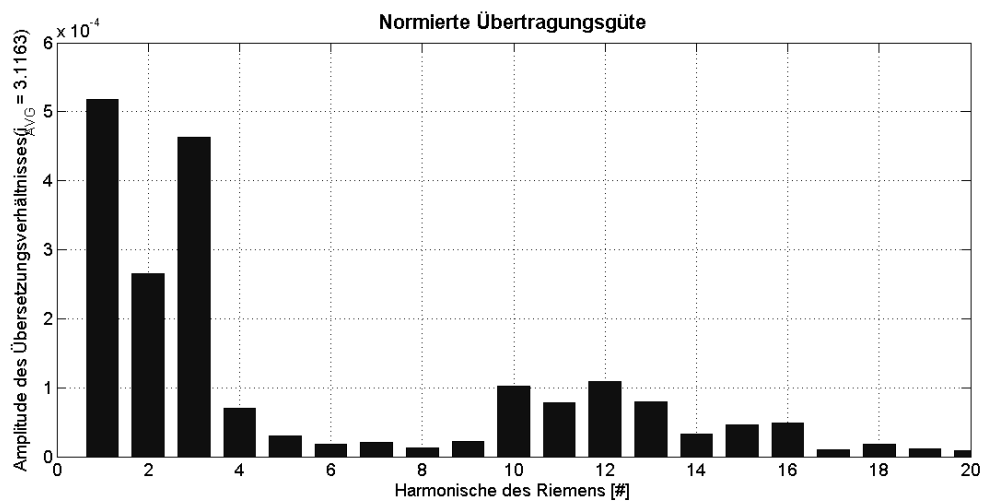


Bild 13 Riemenscheiben-Durchmesser Verhältnis ca. 3:1, kleine RS wie in Bild 9

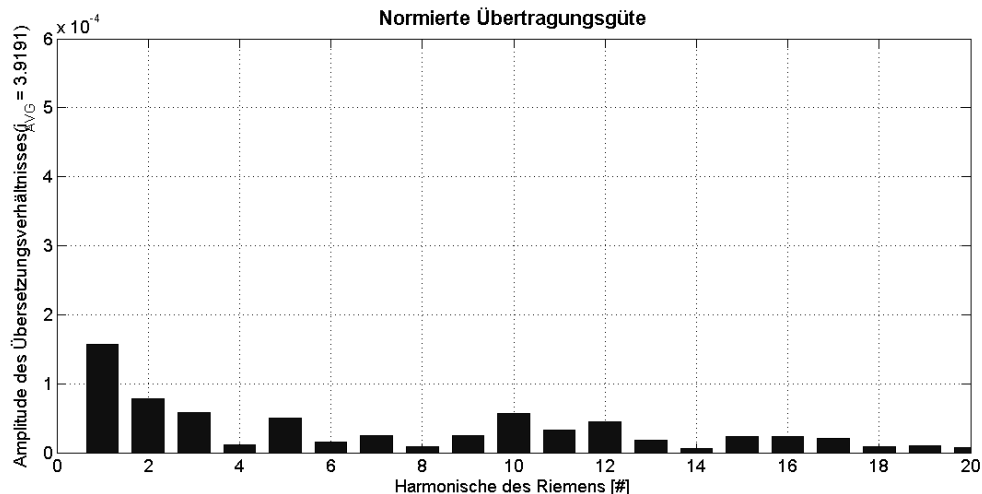


Bild 14 Riemenscheiben-Durchmesser-Verhältnis ca. 4:1, kleine RS mit geändertem Flankenwinkel

Im Anschluss wurde auf die ursprüngliche kleine Riemenscheibe rückgebaut. Es ergab sich ein Durchmesser-Verhältnis von ca. 3:1. In Bild 13 ist klar ersichtlich, dass die untersten Harmonischen für die Übertragungsgüte stark vom Durchmesser der eingesetzten kleinen Riemenscheibe abhängig sind.

Eine Modifikation nur des Flankenwinkels der kleinen Riemenscheibe bei gleichbleibendem Übersetzungsverhältnis und Durchmessern zu den in Bild 9 vorgestellten Ergebnis ist ebenfalls wesentlich. In Bild 14 ist das nachhaltig verbesserte Spektrum der Übertragungsgüte in Folge des geändertem Flankenwinkels der kleinen Riemenscheibe dargestellt.

Zusammenfassend wird geschlussfolgert, dass die Übertragungsgüte für den untersuchten Poly-V-Riementrieb stark beeinflusst wird durch:

1. Durchmesser der kleinen Riemenscheiben: unterschreitet der Durchmesser eine gewisse Größe, wird die Übertragungsgüte schlechter,
2. bei kleinen Riemenscheiben durch den Flankenwinkel: unterschreiten Riemenscheiben einen gewissen Durchmesser, kann die Übertragungsgüte durch Modifikation des Flankenwinkels verbessert werden

6. Schlusswort

Die Messung der Übertragungsgüte ist relativ einfach und sehr genau möglich. Für die Serienprüfung von Riementrieben/ Riemen bietet sich ein spezieller Prüfstand an, an dem die Prüfung in wenigen Minuten wiederholgenau abläuft. An einzelnen Maschinen und Anlagen, zur Ursachenerforschung oder nur zur Prüfung der Übertragungsgüte einzelner Riementriebe bietet sich das Messen direkt vor Ort an. Es ist ausreichend, an den beiden Riemen-

scheiben Drehgeber anzubauen. Aus der Aufzeichnung der beiden Drehgebersignale kann, unter Verwendung der im Beitrag vorgestellten Methoden, auf die den Riementrieb betreffenden und zu beurteilenden Signalanteile geschlossen werden. Wesentlich ist weiterhin, dass durch die Messung der Übertragungsgüte von Riementrieben eine Optimierung dahingehend erfolgen kann, dass mittels der Wahl von kleinsten Durchmessern oder der Modifikation von Flankenwinkeln von Riemenscheiben die Übertragungsgüte maßgeblich verbessert werden kann.

Literatur

- [1] Ullrich, M.: Praktikumsbericht, Praktikum, Radebeul, 2008